

## 미소해칭 전열관의 표면거칠기에 따른 흡수열전달 특성

조 현 철, 김 춘 동\*, 김 익 생\*, 박 찬 우\*, 강 용 태\*\*  
 경희대학교 대학원, \*LG전선(주) 기계연구소, \*\*경희대학교 기계산업시스템 공학부

### Charactristics of Absorption Heat Transfer on Micro-Scale Hatched Tubes with Different Surface Roughness

Hyun Churl Cho, Choon dong Kim\*, Ig Saeng Kim\*, Chan Woo Park\*, Yong Tae Kang\*\*

Graduate School, Kyunghee University, Suwon 449-701, Korea

\*LG Cable Ltd., Machinery Research Lab., Anyang, 431-080, Korea

\*\*College of Mechanical & Industrial System Engineering, Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea

(Received November 17, 2001; Revision received July 8, 2002)

**ABSTRACT:** Objectives of this paper are to investigate the effect of roughness of micro-hatching tubes on the absorption performance and to develop on experimental correlation of Nusselt as a function of the roughness. Three different micro-scale hatched tubes and a bare tube were tested in the present experiment. H<sub>2</sub>O/LiBr solution is used as working fluid. It was found that absorption performance of micro-scale hatched tubes were improved upto 2 times with an error band of  $\pm 25\%$  compared with the bare tube. An experimental correlation of Nusselt was developed as a function of the roughness.

**Key words:** Roughness(거칠기), H<sub>2</sub>O/LiBr, Performance improvement(성능향상), Absorber(흡수기), Micro-scale hatched tubes(미소해칭 전열관)

#### 기 호 설 명

$c_p$  : 비열 [kJ/kg · K]

$d$  : 관의 내경 [m]

$g$  : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]

$h$  : 열전달계수 [kW/m<sup>2</sup> · K]

$H$  : 엔탈피 [kJ/kg]

$k$  : 열전도도 [kW/m · K]

$L$  : 관의 길이 [m]

$\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]

$N$  : 열(row)의 수

$Nu$  : Nusselt 수,  $\{h(\nu^2/g)\}^{1/3}/k$

$Pr$  : Prandtl 수,  $(c_p \mu)/k$

$Re$  : Reynolds 수,  $\rho dv/\mu$

$Re_f$  : film Reynolds 수,  $4\Gamma/\mu$ ,  $\Gamma = (\dot{m}_{sol, in}/2)/L$

$T$  : 온도 [°C]

$U$  : 총열관류율 [kW/m<sup>2</sup> · K]

$v$  : 속도 [m/s]

$x$  : H<sub>2</sub>O/LiBr 용액 농도 [LiBr 질량 %]

#### 그리스 문자

$\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]

$\mu$  : 점성계수 [kg/m · s]

$\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$\epsilon$  : 표면거칠기 [ $\mu\text{m}$ ]

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-201-2990

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

## 하첨자

$t$	: 튜브
$cw$	: 냉각수
$sol$	: H <sub>2</sub> O/LiBr 용액
$in$	: 입구
$out$	: 출구
$v$	: 증기

## 1. 서론

가스구동 흡수식 시스템은 자원고갈과 환경오염 문제에 직면한 인류에게 여러 가지 유익을 가져다 준다. 첫째, 시스템의 고효율에 따른 매력적인 경제성을 제공하고, 둘째 천연가스의 사용으로 인하여 여름철 최대 전력수요를 완화하고, 셋째 자연냉매를 사용함으로써 오존층 파괴 문제와 지구온난화 현상을 완화한다. 이러한 장점으로 흡수식 시스템의 수요는 점차 늘고 있으며 열교환기의 열 및 물질전달 향상에 따른 고효율화에 대한 연구가 계속되고 있다.

흡수식 시스템은 대부분의 구성부품이 열교환기로 이루어져 있고, 특히 흡수기의 성능향상이 기술의 핵심요소이다.

흡수기의 성능을 향상시키는 수단으로 기계적인 방법과 화학적인 방법에 이용되고 있다. 먼저 기계적인 방법으로는 CCS관,<sup>(1)</sup> 플루티드관<sup>(2)</sup> 등 표면가공 열전달면<sup>(3)</sup>을 이용하거나 전열 표면에 거칠기를 만드는 방법<sup>(4)</sup>과 뛰어난 열전달계수를 제공하는 효과적인 열전달 모드를 개발하는 방법이 있다. 효과적인 열전달 모드로는 박막형 모드와 기포형 모드가 있다. 박막형은 현재에도 리튬브로마이드 및 암모니아-물의 흡수기 설계에 널리 이용되고 있는 열전달 모드로서 상대적으로 높은 열전달계수와 안정된 운전특성을 제공한다. 그러나 전열면이 국부적으로 적셔지지 않는 문제로 인하여 열전달능력이 저하되는 경우가 있으며, 액류의 유입부에 액류분류기를 반드시 설치하여야 한다.

최근에는 기포형의 흡수기가 암모니아-물의 흡수기 설계에 유력하게 추천되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 기포형 흡수기는 높은 열 및 물질전달계수를 제공할 뿐만 아니라 액류가 벽면에 자동적으로 잘 적셔지게 하며 액류와 기류 사이에 높은 혼합률을 제공

한다. 박막형에서는 액류분류기가 요구되는데 반하여 기포형에서는 기류분류기의 설치가 요구되는데 일반적으로 액류분류기보다는 기류분류기가 설계면에서 용이하다. 특히 암모니아/물에서 뛰어난 열 및 물질전달성능을 제공하는 기포식 흡수에 관한 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다.

화학적인 방법으로는 흡수첨가제를 사용하여 마란고니 대류를 발생시킴으로써 열전달성능을 촉진시키는 방법이 연구되고 있는데, 이에 대한 실험결과와 모델개발이 Kang et al.<sup>(6)</sup>에 나타나 있다. 이렇게 흡수기의 성능을 향상시킴으로써 소형화에 따른 원가절감, 생산성 향상의 효과를 얻을 수 있고 이는 흡수식 시스템의 경쟁력 확보에 중요한 요건이 된다.

따라서 본 연구의 목적은 H<sub>2</sub>O/LiBr 흡수기 전열관의 표면을 미소해칭 가공하여 젖음면적 확대에 따른 전열 및 흡수성능의 향상을 실험적으로 제시하는 것이다. 미소해칭 전열관의 표면거칠기가 전열성능에 미치는 영향을 실험적 상관식으로부터 정량적으로 판단할 수 있다. 표면을 미소해칭 처리하는 것이 전열관의 형상을 바꾸는 것보다 가공비용이 적게 들면서 성능향상을 기대할 수 있으므로 실제 제품에 적용시 생산단가를 낮추어 경쟁력 상승에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 흡수기의 내부에 실험대상 전열관 24개를 일렬로 장착한다. 각 관과 실험장치의 몸체 사이는 기밀유지를 하고 맨 아랫단에서부터 관내로 냉각수가 유입되어 차례로 각 단을 지나 맨 위의 관을 통해 나간

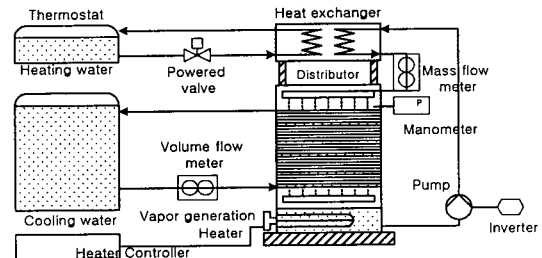


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

다. 각 관의 양 끝단에는 백금저항온도계를 관 내부에 설치하여 각 단을 지날 때의 냉각수 온도를 측정한다.

실험조건 농도로 맞추어진 용액을 시스템 내부에 주입하고 장치를 작동시킨 후 정상상태에 도달했을 때 용액의 농도를 측정하여 각 전열관별 입구농도를 일정하게 설정했다. 용액의 입구온도 제어를 위해서 실험장치 상부에 열교환기를 설치하였다. 항온조에 50~55℃의 온수를 저장하고 이 온수는 관을 통해 열교환기로 유입되어 액류분류기로 들어가기 직전의 용액과 열교환을 하여 용액의 온도를 실험조건의 온도로 설정한다. 본 실험에서 냉각수 및 용액온도 측정시 실험오차는 ±0.2℃이다. 열교환기를 통해 설정온도로 맞추어진 용액은 액류분류기로 유입 직전 전자식 질량유량계에 의해서 질량유량이 측정된다. 질량유량계의 측정오차는 ±0.1%이다.

용액은 액류분류기에서 첫번째 관의 표면에 고르게 액적상태로 떨어지고 24개의 관의 표면을 차례로 적시면서 제 24번째 관의 밑에 설치되어 있는 용액받침대에 고이게 된다. 용액의 온도는 액류분류기의 입구와 용액받침대에 설치된 백금저항온도계로서 시험부의 입구와 출구값이 측정된다. 용액의 농도측정을 위해서 액류분류기와 질량유량계 사이의 관에 앵글밸브를 설치하여 진공펌프를 이용하여 추출한 후 굴절률계를 이용하여 측정하였다. 굴절률계의 농도측정오차는 ±0.02%이다.

용액받침대에 고인 용액은 받침대를 채우고 넘

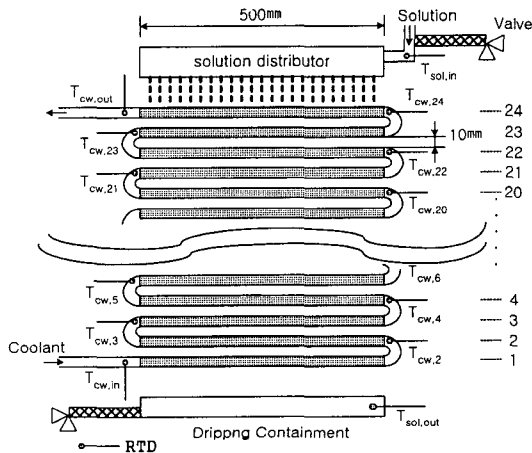


Fig. 2 Test section.

쳐 흡수기 하부에 고이게 된다. 하부에 고인 용액은 증기발생용 히터에 의해서 수증기로 증발된다. 이 수증기는 증발기에서 유입되는 냉매증기의 역할을 하며 맨 아래의 전열관에서부터 위로 올라가며 흡수된다. 용액에는 계면활성제와 부식방지제를 첨가하지 않고 데이터 취득 전까지 충분한 시간 동안 진공펌프로 추기를 하여 불응축가스의 영향은 무시한다. 흡수기의 내부 압력은 하부 증기발생용 히터의 전류세기에 의해 제어되어 0.94 kPa로 유지되며 이는 흡수기 내부에 연결된 전자식 절대압력계로서 측정된다. 압력계의 측정오차는 ±0.2%이다. 하부에 고인 용액은 보조용액탱크를 거쳐 용액펌프에 의해 상부의 열교환기로 공급된다. 용액의 유량은 마그네틱 기어 펌프에 의해서 조절된다.

Fig. 2에 시험부의 개략도와 냉각수 및 용액의 온도측정 지점이 나타나 있고 Fig. 3에 본 실험에서 사용된 나관과 #24 튜브의 표면형상이 비교되어 있다. Fig. 4에는 #24 튜브와 로렛관의 표면처리 특성이 나타나 있다. 냉각수의 경우 입구 직전에 전자식 체적유량계에 의해서 유량이 측정되며 측정오차는 ±0.05%이다. 본 연구에서 사용된 나관은 아무런 가공을 하지 않은 튜브이며, 로렛관은 표면에 60°의 나선형으로 좁고 깊은 홈이 파이도록 가공된 튜브이다. #600과 #24 튜브는 각각 #600 및 #24번 사포로 표면을 가공한 튜브이다. 미소해칭 전열관에 대한 기하학적 조건과 실험조건들이 Table 1과 Table 2에 각각 정리되어 있다.

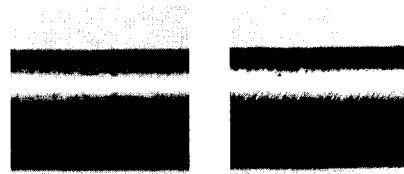


Fig. 3 Bare tube and #24 tube.

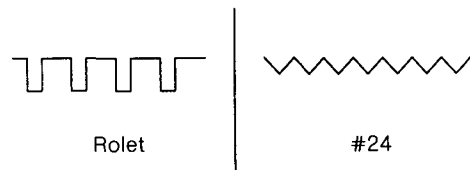


Fig. 4 Sectional diagram of rolet and #24 tube.

Table 1 Geometric conditions of micro-hatched tubes

Tube	Characteristics	Roughness ( $\mu\text{m}$ )	Shape
Bare	-	0	
Rolet	Grooved	11.359	copper circular tube
#600	Grooved with sandpaper #600	0.386	$d_i$ : 0.0149 m $d_o$ : 0.0160 m
#24	Grooved with sandpaper #24	6.968	Length : 0.5 m Helix angle : 60°

Table 2 Experimental conditions

Inlet concentration of solution (%)	55	58	61
Inlet temperature of solution ( $^{\circ}\text{C}$ )	36	41	46
Inlet temperature of cooling water ( $^{\circ}\text{C}$ )	24	28	32
Internal pressure (kPa)	0.94		

### 3. 실험결과 처리방법

시험부에 대한 Fig. 5의 검사체적에 대하여 질량, 농도, 에너지 및 열전달 방정식을 고려하여 실험결과를 처리하였다. 전열관별 증기흡수성능을 판단할 지표로서 증기흡수율을 식(1)과 식(2)로 구할 수 있으며, 전열성능의 판단지표로는 Nu를 사용했다.

#### 검사체적 내 질량보존식

$$\dot{m}_{sol,in} + \dot{m}_{vap} = \dot{m}_{sol,out} \quad (1)$$

#### 검사체적 내 농도보존식

$$x_{in} \dot{m}_{sol,in} = x_{out} \dot{m}_{sol,out} \quad (2)$$

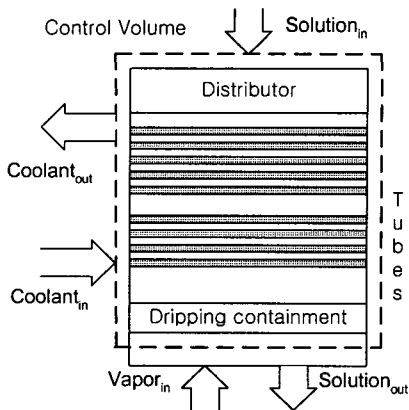


Fig. 5 Control volume.

#### 에너지 평형식

$$Q_c = \dot{m}_{cw,in} c_{pc} (T_{cw,out} - T_{cw,in}) \quad (3)$$

$$= \dot{m}_{sol,in} H_{sol,in} - \dot{m}_{sol,out} H_{sol,out} + \dot{m}_v H_v$$

#### 열전달 방정식

$$Q_c = UA \Delta T_{lm} \quad (4)$$

여기서

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{sol,in} - T_{cw,out}) - (T_{sol,out} - T_{cw,in})}{\ln \frac{(T_{sol,in} - T_{cw,out})}{(T_{sol,out} - T_{cw,in})}} \quad (5)$$

이고

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{cw}} + R_w + \frac{1}{h_{sol}} \quad (6)$$

이다. 여기서  $R_w$ 는 관벽면을 통한 전열저항이다. 식(6)에서 냉각수측의 열전달계수  $h_{cw}$ 는 원형관 내 유동에 대하여 Dittus-Boelter<sup>(4)</sup> 식을 이용하여 구하였다. 식(1)~(6)을 통하여 용액측의 열전달계수  $h_{sol}$ 을 구하고, 이때 Nusselt 수는 다음으로 정의된다.

$$Nu = \frac{h_{sol}}{k} \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} \quad (7)$$

식(7)에서 정의된 Nusselt 수의 계산에서 본 실험

결과의 온도 및 유량측정에 따른 오차로부터 불확실성은  $\pm 10.0\%$ 로 계산되었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6에 정상상태에서 냉각수가 전열관을 통해 입구에서 출구로 나가는 동안 각 단의 온도변화가 나타나 있다. 여기서  $N$ 은 시험부 하단으로부터의 열(row)수이다. 표면이 가장 거친 #24튜브의 입출구 온도차가 상대적으로 가장 크게 나타났는데 이는 표면거칠기에 따른 젖음률 향상에 기인한다. 표면거칠기의 증가로 인해 관 표면에 대한 용액의 젖음면적이 증가하게 되고 그만큼 용액과 냉각수 간의 열전달량이 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 7와 Fig. 8에 각 농도 조건에서의 용액유량 변화에 따른 증기흡수율 변화가 나타나 있다. 대부분의 유량조건에서 #24튜브가 가장 우수한 흡수성능을 나타내었음을 알 수 있다. 본 실험에서의 경우 나관에 비하여 최대 2배까지 증가하였다. 젖음률이 증가함에 따라 용액과 냉각수 간의 열교환 면적과 용액과 증기와의 물질전달 면적증가로 인해 흡수성능도 함께 상승하였다.

전반적으로 #24, #600, 로렛의 순서로 나타났는데 로렛관의 경우 사포로 표면가공된 관과는 달리 홈의 깊이가 깊고 홈의 간격은 좁다. 따라서 홈 내부에 용액이 고이는 현상이 발생하고 용액이 관의 표면에서 넓게 퍼지는 성질은 상대적으로 떨어짐을 확인하였다. 또한 낮은 유량에서 높은 유량으로 갈수록 흡수율도 증가하여 본 실험

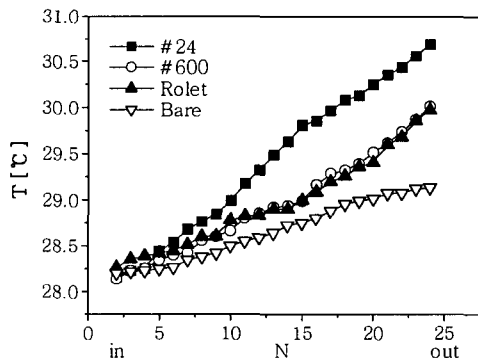


Fig. 6 Temperature profile of the coolant. [ $x_{sol}=58\%$ ,  $Re_{\Gamma}=20$ ,  $Re_{cw}=25000$  (150 lpm),  $T_{sol,in}=41^{\circ}\text{C}$ ]

조건 내에서 액막유량이 증가할수록 튜브 표면거칠기의 영향이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9과 Fig. 10에는 55%와 61%의 용액 농도 조건에서 용액의 film Reynolds 수의 변화에 따른 Nusselt 수의 변화가 각각 나타나 있다. 증기흡수율의 결과와 비슷하게 비례하는 경향을 보였으며 #24튜브의 열전달성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 표면거칠기의 증가로 인한 젖음률 증가는 24개 튜브의 아랫단으로 갈수록 확인해지는데 용액과 냉각수 간의 열교환량 증가로 이어지고 상대적으로 과냉되는 용액은 흡수 포텐셜이 증가하여 그만큼 더 많은 증기를 흡수할 수 있게 된다. 농도가 증가함에 따라 #24와 #600의 증기흡수량의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 한편 동일 농도조건에서는 액막유량이 증가할수록 #24튜브와

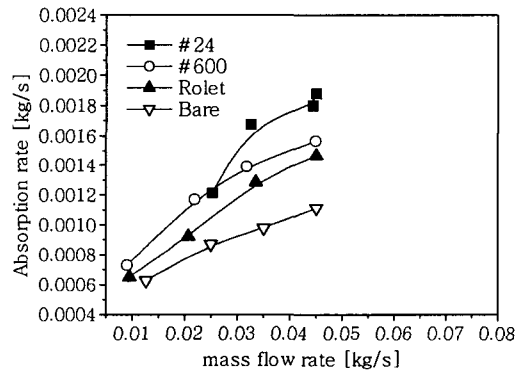


Fig. 7 Vapor absorption rate versus solution mass flow rate. [ $x_{sol,in}=55\%$ ,  $Re_{cw}=48000$ ]

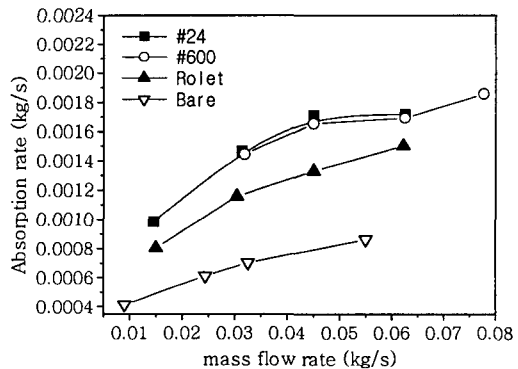


Fig. 8 Vapor absorption rate versus solution mass flow rate. [ $x_{sol,in}=61\%$ ,  $Re_{cw}=48000$ ]

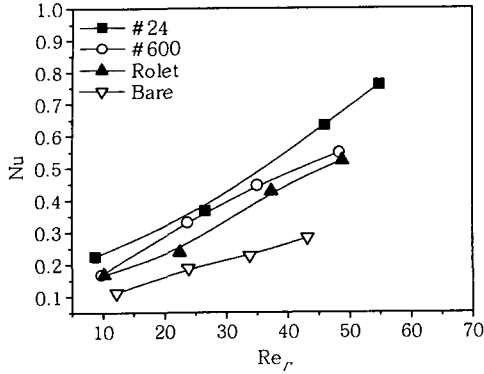


Fig. 9 Nu versus  $Re_r$ .  
[  $x_{sol, in} = 55\%$ ,  $Re_{cw} = 42000$  ]

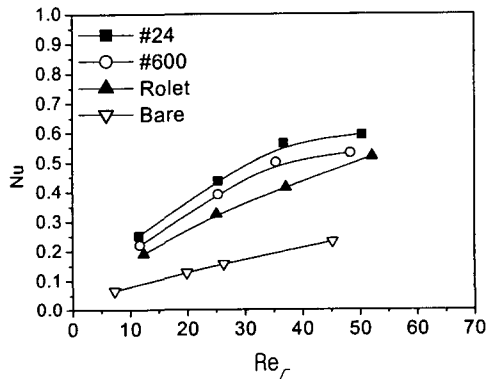


Fig. 10 Nu versus  $Re_r$ .  
[  $x_{sol, in} = 61\%$ ,  $Re_{cw} = 50000$  ]

나관의 전열성능 차이가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11에 본 연구에서 최종적으로 얻어진 Nusselt 수에 대한 다음의 실험적 상관식이 나타나 있다.

$$Nu = 0.024 Re_r^{6.688} (1 + \epsilon \times 10^6 / d)^{0.107} \quad (8)$$

여기서  $\epsilon/d$ 는 전열관의 직경으로 무차원화된 표면거칠기를 나타내고, 막레이놀드수  $Re_r$ 는 다음으로 주어진다.

$$Re_r = \frac{4\Gamma}{\mu_{sol}} \quad (9)$$

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_{sol, in} / 2}{L}$$

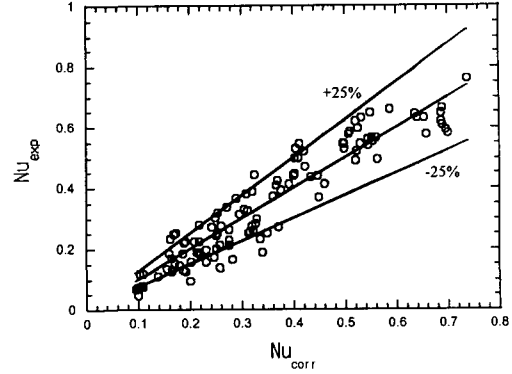


Fig. 11 Experimental correlation.

본 실험조건에서 막레이놀드수는 층류영역에 있어서 Prandtl 수의 영향은 크게 나타나지 않았고, 따라서 상관식에 포함되지 않았다. 위의 상관식은 액막 Reynolds 수 7~60 범위에서  $\pm 25\%$  오차범위를 가지며, 흡수식 냉동기에서 일반적으로 사용되는 내경 14.9 mm, 외경 16.0 mm의 원형 나관 및 미소해칭 전열관에 대하여 적용될 수 있다. 본 연구에서 얻어진 실험적 상관식은 미소해칭 전열관을 사용한 초소형 흡수기를 설계하는데 유용하게 이용될 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서 얻어진 미소해칭 전열관의 표면거칠기가 흡수성능에 미치는 영향에 대한 실험적 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 표면처리 가공한 튜브가 젖음물의 증가로 인하여 나관에 비해 흡수 및 전열성능이 향상되었다. #24 튜브는 나관보다 흡수성능이 최대 2배까지 향상되었다.

(2) 본 연구의 실험조건 내에서 튜브의 표면거칠기가 흡수성능에 미치는 영향은 액막유량이 증가할수록 커졌다.

(3) 미소해칭 전열관에서 Nusselt 수에 대한 실험적 상관식을  $\pm 25\%$  오차범위 내에서 제시하였다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산업기반기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Isshiki, N. and Ogawa, K., 1996, Enhancement of heat and mass transfer by CCS tubes, Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, Montreal, Canada, Vol. 1, pp. 335-341.2.
2. Christensen, R. N., Cook, F. B. and Kang, Y. T., 1997, Capillary fluted tube mass and heat transfer devices and methods of use, U. S. Patent Number: 5617737.
3. Chyu, M.-C. and Bergles, A. E., 1989, Horizontal tube falling film evaporation with structured surfaces, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 111, p. 524.
4. Kim, K. H., Min, B. H. and Jeong, S. Y., 2000, An experimental study for the effects of heat exchanger surface shape on a falling liquid film of absorption chiller, Proc. of The 1st National Congress on Fluids Eng., Muju, Korea, pp. 811-814
5. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 2000, Analytical investigation of two different absorption modes: Falling film and Bubble types, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, No. 6, pp. 430-443.
6. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 1999, Experimental investigation of Marangoni convection in aqueous LiBr-H<sub>2</sub>O solution with heat transfer additives, ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 121, No. 4, pp. 1088-1091.